大气科学
CHINESE JOURNAL OF ATMOSPHERIC SCIENCES

中国东部夏季极端降水年代际变化特征及成因分析

杨涵洧 龚志强 王晓娟 封国林

Analysis of the Characteristics and Causes of Interdecadal Changes in the Summer Extreme Precipitation over Eastern China

YANG Hanwei GONG Zhiqiang WANG Xiaojuan FENG Guolin

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2007.19247

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

青藏高原夏季大气视热源与中国东部降水的关系的年代际变化
大气科学. 2019, 43(5): 990 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1901.18141

年后中国北方东部地区夏季极端降水减少及水汽输送特征
Decrease in Extreme Precipitation in Summer over East Northern China and the Water-Vapor Transport Characteristics after Year 2000
大气科学. 2019, 43(5): 1109 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1902.18198

中国南方夏季降水的年代际变率主模态特征及机理研究
Characteristics and Corresponding Mechanisms of the Leading Modes of Interdecadal Variability of Summer Rainfall in Southern China
大气科学. 2018, 42(4): 859 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1802.17283

论东亚夏季风的特征、驱动力与年代际变化
On the Characteristics, Driving Forces and Inter-decadal Variability of the East Asian Summer Monsoon
大气科学. 2018, 42(3): 533 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1712.17261

我国冬季极端低温指数的年代际变化特征
Interdecadal Variation Characteristics of Extreme Low Temperature Index in Winter in China
大气科学. 2020, 44(5): 1125 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2003.19242

亚洲夏季风天季节内振荡对中国东部地区持续性极端降水的影响
大气科学. 2019, 43(4): 796 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1809.18145

关注微信公众号，获得更多资讯信息

杨涵洧, 龚志强, 王晓娟, 等. 2021. 中国东部夏季极端降水年代际变化特征及成因分析 [J]. 大气科学, 45(3): 683−696. YANG Hanwei, GONG Zhiqiang, WANG Xiaojuan, et al. 2021. Analysis of the Characteristics and Causes of Interdecadal Changes in the Summer Extreme Precipitation over Eastern China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 45(3): 683−696. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2007.19247

中国东部夏季极端降水年代际变化特征及成因分析

杨涵洧[1] 龚志强[2] 王晓娟[3] 封国林[2]

1 上海市气候中心/中国气象局上海城市气候变化应对重点开放实验室，上海 200030
2 中国气象局国家气候中心开放实验室，北京 100081
3 常熟理工学院物理与电子工程学院，常熟 215500

摘 要 本研究利用逐日降水资料对中国东部夏季极端降水进行检测，并对转变前后的特征进行对比分析，进而从海、陆对增温的响应不同导致的环流调整给出成因分析。结果表明，（1）中国东部夏季极端降水在 1990 年前后出现显著的年代际转变，极端降水由偏少转为偏多。转折后与转折前相比，中国东部夏季极端降水落区南移，南方偶极子分布型加强，南方极端降水增加、北方极端降水减少，其中华南和华东地区，极端降水量和降水日数增加，对夏季降水的贡献率增大；华北地区，极端降水量和降水日数减少，对夏季降水的贡献率减小。（2）西太平洋暖池区异常升温造成的海陆温差减小是中国东部夏季极端降水 1990 年前后转变的重要驱动因素之一。它造成 1990 年之后低纬度季风强度减弱、西太平洋副热带高压增强并南移、南海副高增强，而中高纬度气旋性环流异常被破坏、东亚大槽增强，进而导致华北经向水汽输送减弱，下沉运动显著加强，极端降水量和降水日数减少。于此同时，华南和华东地区则水汽输送加强，上升运动显著，有利于降水偏多，并伴随极端降水量和降水日数有所增加。

关键词 极端降水 年代际转变 海陆热力性差异 东亚夏季风系统
文章编号 1006-9895(2021)03-0683-14 **中图分类号** P467 **文献标识码** A
doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2007.19247

Analysis of the Characteristics and Causes of Interdecadal Changes in the Summer Extreme Precipitation over Eastern China

YANG Hanwei[1], GONG Zhiqiang[2], WANG Xiaojuan[3], and FENG Guolin[2]

1 *Shanghai Climate Centre/Key Laboratory of Cities Mitigation and Adaptation to Climate Change in Shanghai*, *China Meteorological Administration*, *Shanghai* 200030
2 *Laboratory for Climate Studies*, *National Climate Center*, *China Meteorological Administration*, *Beijing* 100081
3 *College of Physics and Electronic Engineering*, *Changshu Institute of Technology*, *Changshu*, *Jiangsu Province* 215500

Abstract Using daily precipitation data from eastern China, in this study, we investigated the interdecadal shift in the summer extreme precipitation (SEP) and analyzed the characteristics before and after the climate shift. We also analyzed the cause from the perspective of different responses to global warming between land and ocean, which leads to

收稿日期 2019-12-16；**网络预出版日期** 2020-08-03
作者简介 杨涵洧，男，1988 年出生，硕士，工程师，主要从事气候与气候变化研究。E-mail: Harvey_Young@163.com
通讯作者 王晓娟，E-mail: mouse0903@126.com
资助项目 国家重点研发专项 2018YFA0606301、2018YFC1507702，国家自然科学基金项目 41875100、41875093，上海市气象局科技开发项目 YJ201804
Funded by National Key Research and Development Program of China (Grants 2018YFA0606301, 2018YFC1507702), National Natural Science Foundation of China (NSFC) (Grants 41875100, 41875093), Science and Technology Development Project of Shanghai Meteorological Bureau (Grant YJ201804)

circulation adjustments. The results show that the SEP in eastern China exhibited an obvious interdecadal shift around 1990, after which it became a positive anomaly. Compared with the SEP before the shift, the distributions of major modes shifted south, the intensity of SEP was enhanced, and the contribution rate to summer precipitation increased in both South and East China, whereas in North China all of these factors exhibited the opposite change. The change in the temperature difference between land and ocean caused by the strong positive anomaly of the sea surface temperature in the western Pacific warm pool is one of the important factors driving this shift, leading to the interdecadal adjustment of the East Asia summer monsoon system. In the low–middle latitudes, the intensity of the summer monsoon weakened, the West Pacific subtropical high strengthened and moved south, and the South China Sea high was also enhanced. In the middle–high latitudes, this cyclonic anomaly was broken and the East Asia Trough strengthened. Under the influence of this circulation adjustment, the water vapor decreased (increases) and vertical motion weakened (is enhanced) in North China (South and East China). Thus, the SEP decreased in North China and increased in South and East China.

Keywords Extreme precipitation, Interdecadal change, Land–sea thermal difference, East Asia summer monsoon system

1 引言

众所周知，极端降水事件对社会、经济乃至人民的生命安全等诸多方面造成了严重的影响和巨大的损失（Li and Wang, 2018）。2012 年 7 月 21～22 日是 1951 年有气象记录以来最强暴雨袭击北京，部分地区的降雨量突破历史记录。北京“7.21”暴雨共造成北京 79 人死亡，经济损失达 116.4 亿元，并对超过 190 万居民造成威胁（Jiang et al., 2014）。

近百年全球气候处于持续变暖的阶段。1880～2012 年，全球平均地表温度升高 0.85°C（IPCC, 2013）。极端降水在全球变暖背景下的变化研究是气象研究人员关注的重点（Feng et al., 2008; 龚志强和封国林, 2008; 翟盘茂等, 2016;），极端降水事件强度和频率发生明显的变化（张勇等, 2006; 任国玉等, 2010），且这种变化具有很强的区域性和局地性（Qian and Lin, 2005; Zhai et al., 2005; 江志红等, 2009;）。国内外已有研究表明，随着变暖加剧，全球极端降水普遍呈现出增加的变化趋势（Goswami et al., 2006），Alexander et al.（2006）利用全球站点观测资料针对极端气候变化开展研究，指出全球极端降水有增加的趋势，尤其在北半球中高纬度地区，即使年降水量减少，其降水的极端性亦会显著增加。孙建奇和敖娟（2013）研究了中国近 50 年来冬季极端降水在年代际尺度上对区域尺度增暖的响应，发现中国区域冬季气温每增加 1°C，极端降水增加 22.6%。在对极端降水的预估研究中，有研究也表明在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下，随着气温的升高，中国区域平均降水和极端降水均呈现一致增加的趋势，中国区域平均气温每升高 1°C，第 95 百分位定义的极端降水分别增加 11.9% 和 11.0%（吴佳等, 2015）。

然而，目前已有的研究大多将过去几十年作为一个整体研究极端降水的时空分布特征。缺乏从年代际转变的角度上，探寻中国极端降水的演变过程。在 20 世纪 80～90 年代，中国气候出现年代际尺度上突变（Yu and Zhou, 2007; Feng et al., 2008; Wu et al., 2010）。东亚夏季风（Ding et al., 2010）和中国东部夏季降水的雨型（黄荣辉等, 2011）存在多次明显的年代际调整过程。对于中国东部夏季极端降水是否存在年代际的调整，调整前后空间模态特征的异同性等问题缺乏一定的研究。此外，目前研究还缺乏中国东部海陆热力性差异对中国东部夏季极端降水的年代际影响方面的研究。

因而，本文利用 Mann-Kendall（M-K）检验和滑动 t 检验（MTT）方法对中国夏季极端降水进行突变检验，并对比分析其在年代际转变前后的时空演变特征；通过对中国东部与西太平洋暖池（海温关键区）海陆热力性差异的研究，探寻其对东亚夏季风乃至中国东部夏季极端降水的影响机制。相关研究将有助于我们加深对全球增暖背景下中国夏季极端降水异常特征及其成因的理解。

2 资料与方法

本文采用中国气象局国家气候中心 1961～2015 年 2000 站的逐日降水站点数据资料，并对其进行质量控制，从中挑选中国东部（105°E 以东）连续性较好站点（共计 1156 站）的逐日降水资料进行分析。

在中国夏季极端降水年代际气候转变分析中，分别采用 M-K 突变检测和滑动 t 检验（MTT）方法对其气候突变特征进行分析，对 M-K 突变检测而言，当显著性水平为 0.05 时，其显著性的临界值为±1.96，统计量 UF 和 UB 介于临界值之间且相交，则其为突变点；滑动 t 检验则采用 T 检验方法进行显著性检验。采用经验正交函数（EOF）（施能, 2009）、相关以及距平等分析方法（魏凤英, 2007），对其时空变化特征进行分析。本文以单站夏季（55 年）逐日降水为样本量，利用百分位阈值法（翟盘茂和潘晓华, 2003）定义极端降水：即某日某站降水量超过 95 百分位降水量，则该日该站出现极端降水。

中国东部夏季极端降水年代际转变成因分析中，本文选用 NCEP/NCAR 提供的 1961～2015 年垂直方向 1000 hPa 到 10 hPa 共 17 层等压面的风场（u、v 分量）、高度场（H）、垂直速度场（ω），水平空间分辨率为 2.5°×2.5°的全球格点再分析月平均资料（Kalnay et al., 1996）。美国 NOAA 提供的 1961～2015 年逐月平均海温场再分析资料（2°×2°）。本文使用的西太平洋副热带高压（西太副高）指标（面积、强度和脊线）、南海副热带高压（南海副高）指标（面积、强度和脊线）和东亚大槽指数均由中国国家气候中心提供 142 环流指数中提取。

本文差值分析均采用 t 检验方法进行显著性检验；回归分析中采用可决系数的平方根，按照相关系数的显著性检验方法进行检验。中国东部夏季极端降水 1981～2010 平均值为 162 mm，1961～2019 年平均值为 155 mm，二者差异较小，对文中整体结果影响不大。因此，由于常规科研和业务工作中在计算距平过程多采用 1981～2010 年平均值为气候态，并以此衡量异常情况，故本文采用该时段均值作为气候态。

3　中国东部夏季极端降水年代际气候转变

从 1961～2015 年中国东部夏季极端降水阈值分布上看（图 1），总体表现为东部高于西部，南方高于北方，自东南向西北递减的分布。东南沿海一线夏季极端降水阈值较大，包括华南、长江中下游等地区，由于其夏季极端降水主要由台风引起

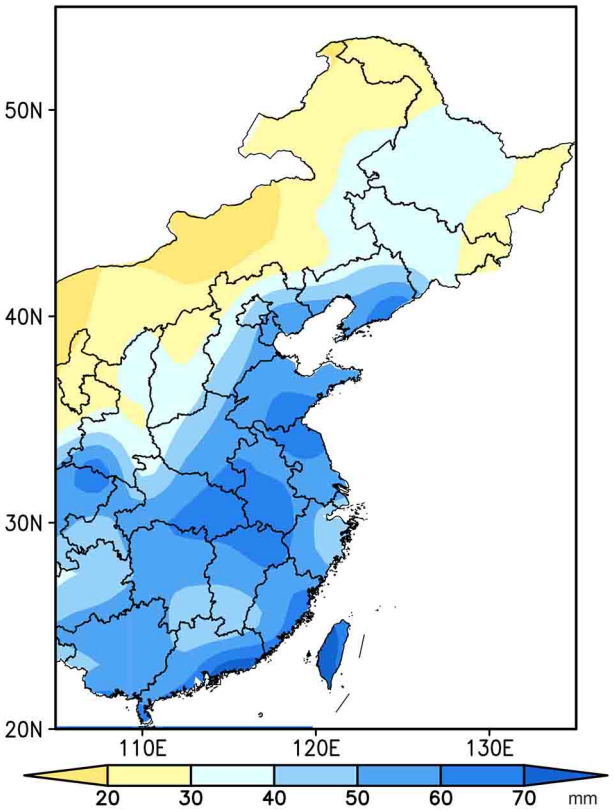

图 1　1961～2015 年中国东部夏季极端降水阈值分布（单位：mm）

Fig. 1　Threshold value distribution of the summer extreme precipitation (SEP) over eastern China from 1961 to 2015 (units: mm)

（江漫和漆梁波, 2016）。此外，在四川省、重庆市和陕西省交界处也存在极端降水阈值中心，其成因一方面受其地形影响，另一方面与中国夏季西南涡的活跃有关（何光碧, 2012）。

为研究极端降水的时间变化特征，将中国东部夏季极端降水距平进行区域平均得到中国东部夏季极端降水距平的时间序列。1961～2015 年中国东部夏季年极端降水存在年际、年代际的变化特征（图 2a）。总体上，中国东部夏季极端降水呈现略微上升的线性趋势，平均单站每十年增加 5.3 mm。其中，1998 年和 1978 年分别是中国东部夏季极端降水最大值和最小值年份，分别为 218 mm 和 96 mm。在年代际尺度上，可以发现，中国东部夏季极端降水在 1990 年前后出现较为明显的位相变化，1961～1990 年中，仅 1964 年及 1969 年为正值年份，其余均处在负位相。而在 1991～2015 年，则转为以正距平为主。分别利用 M-K 突变检验和滑动 t 检验方法对 1961～2015 年中国东部夏季极端

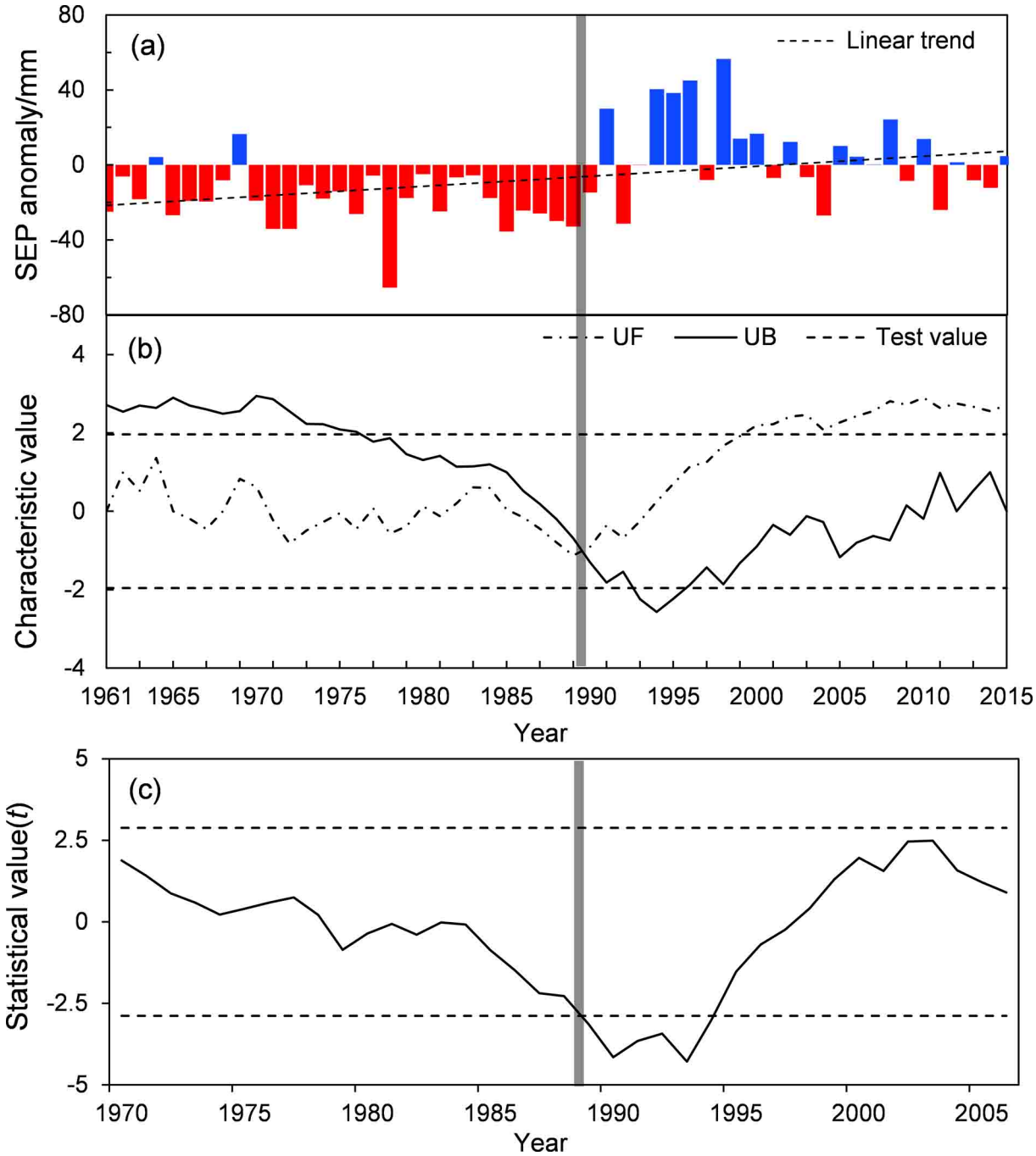

图 2 1961～2015 年中国东部夏季极端降水（a）逐年距平变化及其（b）M-K 突变检验结果和（c）滑动 *t* 检验结果

Fig. 2 (a) Annual anomaly variation of SEP, (b) its M-K test results, and (c) moving *t* test results over eastern China from1961 to 2015

降水距平序列进行突变检测分析，可以发现两种方法均可在中国东部夏季极端降水序列中于 1990 年左右检测出突变信号，即其存在显著的年代际转变特征（图 2b，c）。1990 年前后极端降水的年代际突变的时间，与中国夏季总降水在 1990 年代初的调整时间（黄荣辉等, 2006; 龚志强等, 2013）是一致的，这从侧面证实了本文识别得到极端降水 1990 年前后年代际突变的的正确性。

4 中国东部夏季极端降水空间分布演变特征

4.1 中国东部夏季极端降水模态演变

由上文可知，中国东部夏季极端降水在 1990 年前后出现年代际尺度气候转变，然而这一气候转

变前后中国东部夏季极端降水空间分布特征依然需要进一步进行分析。图 3 给出了 1961～1990 以及 1991～2015 年中国东部夏季极端降水距平 EOF 模态，转折前和转折后 EOF 的前两个模态均能通过 North 检验（North et al., 1982），即模态具有独立性。转折前，前两个模态解释方差分别占总解释方

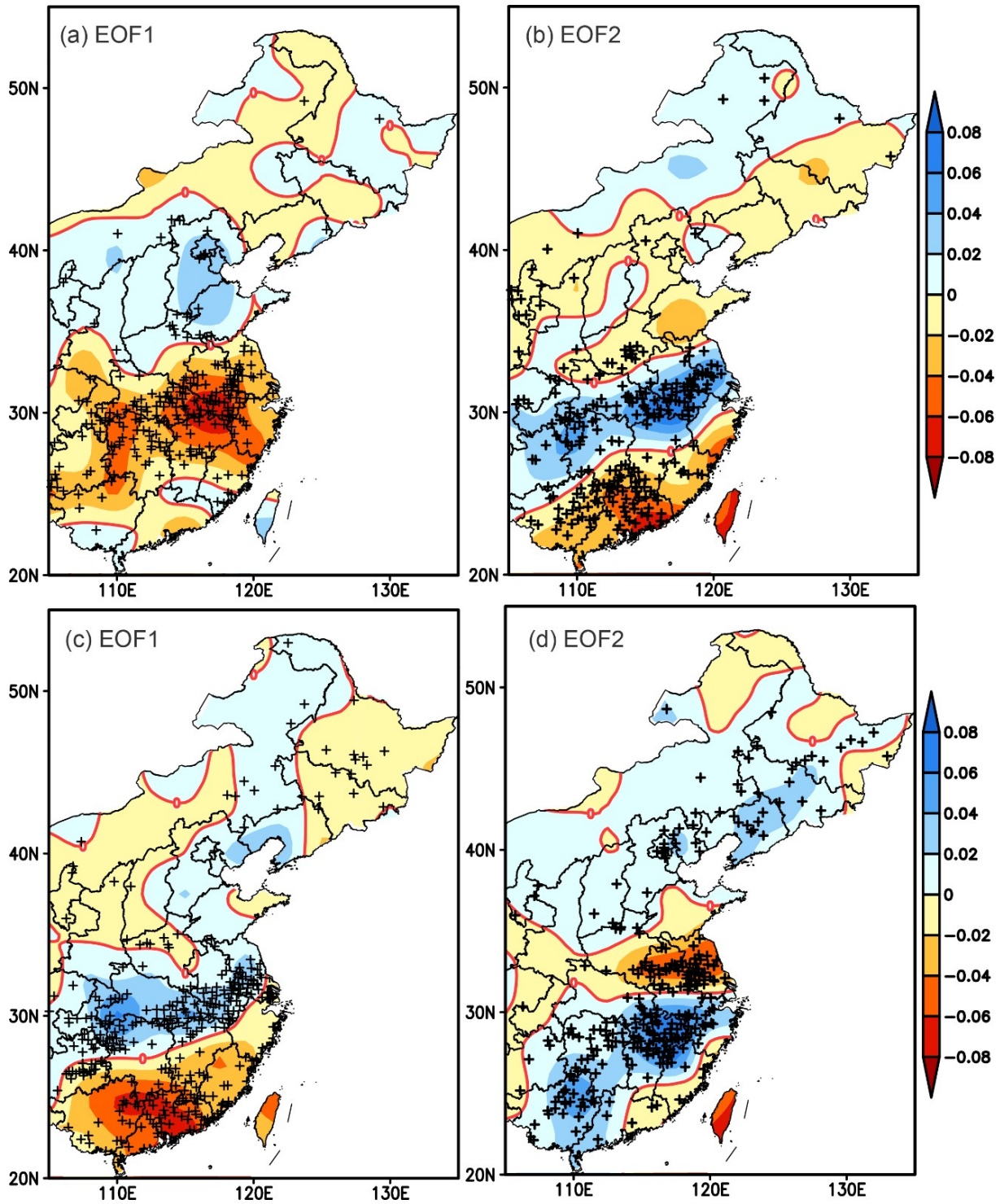

图 3　中国东部夏季极端降水转折前后（a，c）EOF1 和（b，d）EOF2 空间模态：（a，b）转折前（1961～1990 年）；（c，d）转折后（1991～2015 年）。红实线为 0 线；“＋”表示通过 0.05 显著性水平检验

Fig. 3　(a, c) EOF1 and (b, d) EOF2 before and after the climate shift for the SEP in eastern China: (a, b) Before the shift (1961–1990); (c, d) after the shift (1991–2015). Red line indicates 0 value; ＋: significance level of 0.05

差 10.4% 和 8.0%，而转折后前两个模态则分别占总解释方差 11.9% 和 9.7%。转折后前两个 EOF 模态解释方差均有所上升，即模态代表的分布型更为典型。就空间异常分布而言，中国东部夏季极端降水主第一模态在 1990 年前后发生较大的变化。转折前（图 3a），EOF1 主要表现为华北—长江中下游呈现“－、＋”的南北分布型。转折后，这一分布型仍保持，但其“0”线由淮河流域向南移动至长江南侧，以长江为界，呈现出南北“＋、－”的分布型（图 3c）。1961～1990 年中国东部夏季极端降水第二模态的分布型由南向北为典型的“＋、－、＋”模态。从转折前后（转折后与转折前相比，以下同）对比结果可以发现（图 3b、d），其 0 线也向南推移，北侧“0”线由淮河流域南移至长江中下游，南侧“0”线由长江中下游南移至华南北部。此外，淮河以南转折前 EOF2 和转折后 EOF1 在分布上极为相似，表明南方偶极子的分布型在转折后加强成为主模态。已有的研究指出（黄荣辉等, 2011），20 世纪 90 年代初期南方偶极子型降水模态作用加强，而东部极端降水模态出现类似的转变，这也在一定程度说明，夏季极端降水的空间模态可能决定了夏季降水量异常的空间模态。

4.2 中国夏季极端降水特征对比分析

中国东部夏季极端降水在 1990 年前后，其极端降水空间分布型出现了较大的变化。除此之外，由于不同地区对气候变化的响应程度有所不同，导致不同地区在转折前后其极端降水强度、降水日数等特征必然也有所差异。转折前后，中国东部夏季年极端降水量总体上空间分布较为一致，均为东多西少、南多北少的分布型。从极端降水距平变化上看，夏季平均年极端降水距平出现明显的位相变化，空间分布型由南方偏少北方偏多（图 4a）转变为南方偏多北方偏少（图 4b）；显著差异的区域出现在华南、华东和华北（图 4c）。其中华南和华东从负距平转为正距平，大部分地区年极端降水量增多 40 mm，部分地区超过 60 mm。华北大部分地区，平均年极端降水量减少，其中，京津唐地区年极端降水量减少尤为显著，年极端降水量从偏多变为偏少。

转折后中国东部夏季极端降水出现变化的同时，其对夏季降水的贡献率和极端降水日数也出现相应的变化，与极端降水类似，显著变化区域主要出现在华东、华南和华北（图 5）。其中，华东和华南对夏季降水的贡献率由原先的 30% 提高至 35%，部分地区达到 40% 以上（图略）；降水日数提高 1 天左右。华北对夏季降水的贡献率由 35% 降低至 30%，降水日数则减少了 0.5 天左右。

综上，转变前后不同地区夏季极端降水特征的变化，可以发现中国东部夏季极端降水落区整体南移，南方偶极子分布型加强；华南和华东地区，极

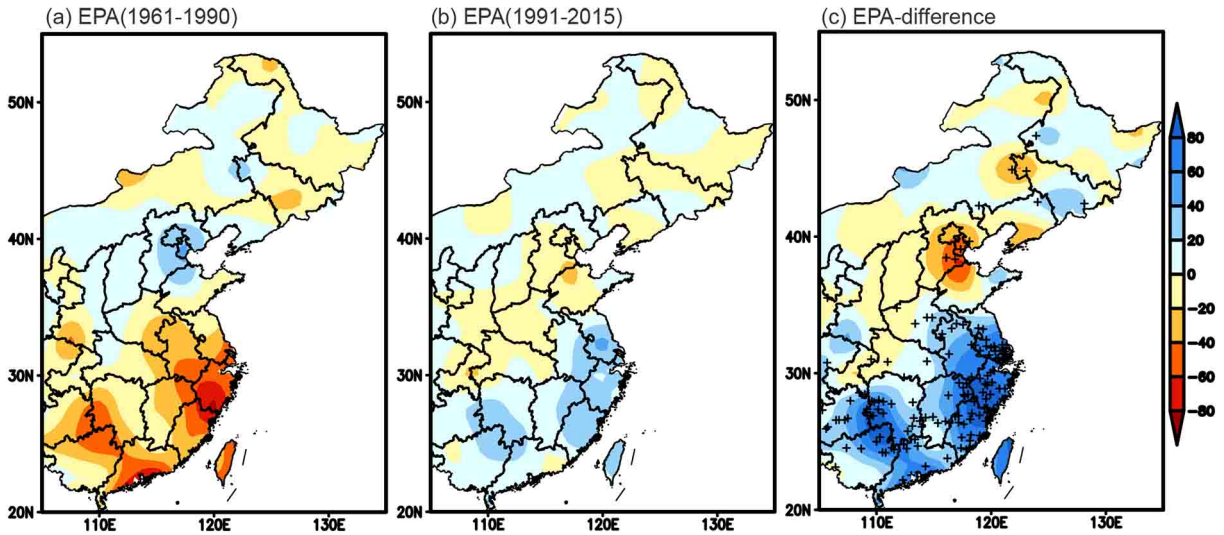

图 4 转折前后中国东部夏季极端降水量距平及差值分布（单位：mm）：（a）1961～1990；（b）1991～2010；（c）降水量差值（转折后－转折前）。“＋”表示通过 0.05 显著性水平检验

Fig. 4 Distribution of precipitation anomalies and difference in the SEP before and after the climate shift in eastern China (units: mm): (a) 1961–1990; (b): 1991–2010; (c) difference (SEP after the shift minus before). ＋: significance level of 0.05

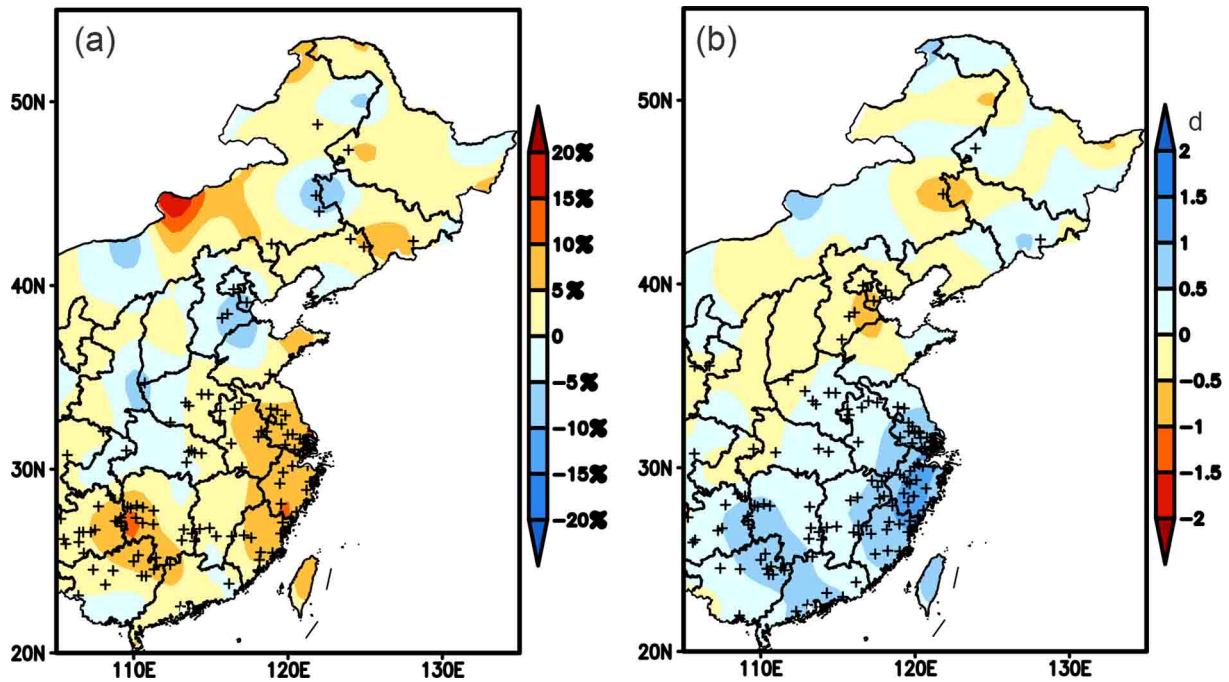

图 5　转折前后中国东部夏季（a）极端降水量贡献率和（b）极端降水日数（单位：d）的差值分布。“＋”表示通过 0.05 显著性水平检验

Fig. 5　Difference in (a) the contribution rate and (b) rainfall days (units: d) of SEP before and after the climate shift in eastern China. ＋: significance level of 0.05

端降水量和降水日数增加，对夏季降水的贡献率增大；华北地区，极端降水量和降水日数减少，对夏季降水的贡献率减小。极端降水对夏季降水的贡献率较大，在一定程度上直接决定了夏季总降水量的模态特征。

5　中国东部夏季极端降水年代际转变成因分析

陆地和海洋对气候变化的响应不同（Zhou and Zou, 2010），其增温速率也不一样，这将导致海陆热力性质差异发生改变，进而通过大气环流调整，影响到降水的年代际变化。计算 1961～2015 年中国东部逐年区域平均夏季极端降水量，得到中国东部夏季区域平均的极端降水量序列，将其与同期夏季平均海温进行相关分析（图 6a），发现对中国东部夏季极端降水影响较大的海温区域位于赤道中部和东部印度洋（关键区 I：20°S～20°N，60°～100°E）和赤道以北西太平洋海域（关键区 II：0°～30°N，100°～160°E）。这两个关键区海温位于西太平洋暖池区，其与中国夏季风进程和水汽输送密切相关（Duan et al., 2008; Lu and Lu, 2015）。从不同时期海温关键区距平对比上看，关键区海温距平在 1990 年前后均从负距平转为正距平，即关键区海温呈现显著上升的趋势（图 6b，c）。

分别计算 1961～2015 年中国东部夏季平均气温和关键区海温的增温速率。中国东部夏季平均气温呈增长的趋势，平均每十年增加 0.07°C；关键区 I 和关键区 II 海温亦呈增长的趋势，平均每十年分别增加 0.14°C 和 0.12°C，关键区海温比中国东部夏季平均气温增温更快。为了进一步对比转折前后海陆热力性差异的变化情况，将中国东部夏季平均气温减去关键区海温，并计算其距平值在转折前后的均值进行对比分析（图 7a，b）可以发现，不论关键区 I 还是关键区 II，其与中国东部夏季平均气温的差值距平均呈现减弱的趋势，即海陆热力性差异减小。采用施能等（1996）定义的东亚夏季风指数与海陆温差进行对比分析（图 8），二者具有较好的关系。年际尺度上，二者具有同步的变化，东亚夏季风指数与关键区海陆温差相关系数分别为 0.40 和 0.30，均通过 0.05 显著性水平检验；在转折前后的年代际尺度上，与海陆温差相似，东亚夏季风亦呈现减弱的变化（图 7c）。因而，关键区海温相比于中国东部地区对气候变化的响应更灵敏，增温速率更快，从而造成海陆热力性差异减小。海陆热力性差异的减小最终导致东亚夏季风的减弱，

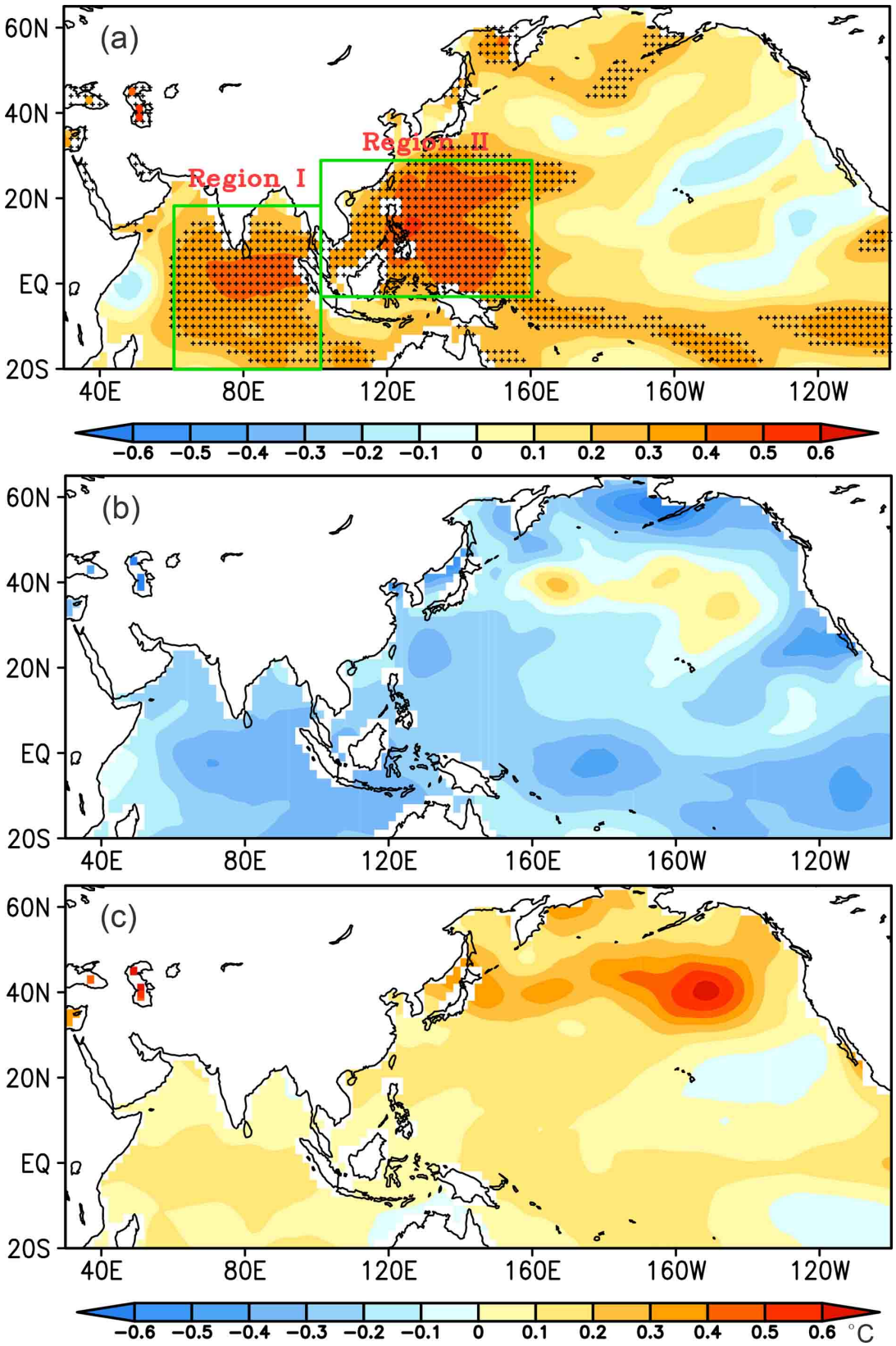

图 6 （a）1961～2015 年中国东部夏季极端降水时间序列与同期夏季平均海温相关及转折（b）前、（c）后海温距平。“＋”表示相关性通过 0.05 显著性水平检验

Fig. 6 (a) Correlation between the summer SST and the SEP time series for eastern China during the 1961–2015 period and (b, c) the SSTA before and after the climate shift (＋: significance level of 0.05)

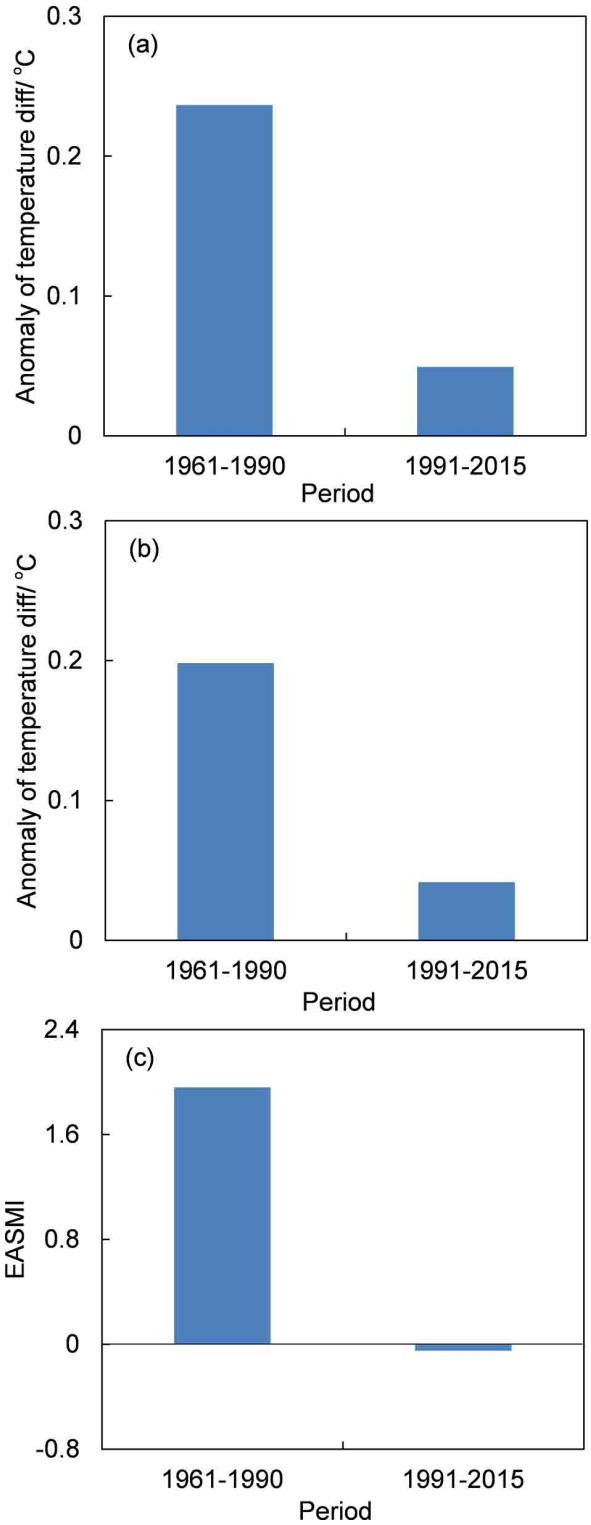

图 7　转折前、后中国东部夏季区域平均气温与（a）关键区 I、（b）关键区 II 夏季区域平均海温差值距平和（c）时间平均的东亚夏季风指数

Fig. 7　Anomalies of differences between area-averaged temperature in summer over eastern China and summer area-averaged SST in (a) key region I and (b) key region II, and (c) time-averaged East Asia summer monsoon index before and after the climate shift

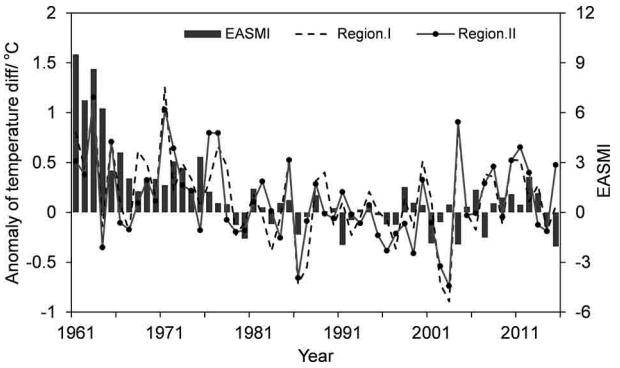

图 8　1961～2015 年中国东部夏季区域平均气温与夏季关键区海温差值的距平和东亚夏季风指数

Fig. 8　Anomalies of differences between area-averaged temperatures over eastern China and SSTs in key regions and annual East Asia summer monsoon index during the 1961–2015 period

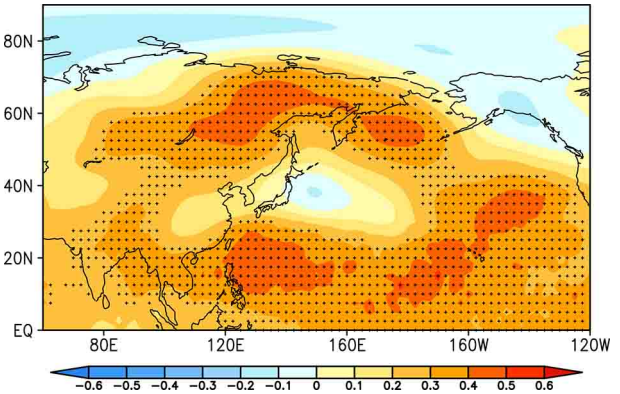

图 9　1961～2015 年北半球 500 hPa 高度场与中国东部区域平均夏季极端降水时间序列相关。“＋”表示通过 0.05 显著性水平检验

Fig. 9　Correlation between the summer 500-hPa geopotential height field in North Hemisphere and the area-averaged SEP time series over eastern China during the 1961–2015 period. ＋: significance level of 0.05

从而不利于低纬度的暖湿气流向中国北方地区输送，造成北方地区水汽输送偏弱，降水偏少。

从 500 hPa 高度场上看，热带西太平洋和中高纬度槽脊位置所在区域上空的环流场与中国东部夏季极端降水呈显著正相关（图 9），分别对应西太平洋副热带高压和东亚大槽所在的关键区域。西太平洋副热带高压与中国夏季降水密切相关，特别是其经向移动一定程度上决定了中国夏季主雨带的变化（Lu, 2002; Yang and Sun, 2003）；而夏季东亚大槽的年代际西移，也是导致华北降水减少的原因之一（王万里等, 2012）。图 10a 给出了转折前后 Walker 环流的差值图。在西太平洋暖池区持续增温背景下，低纬度地区在赤道西太平洋 Walker 环

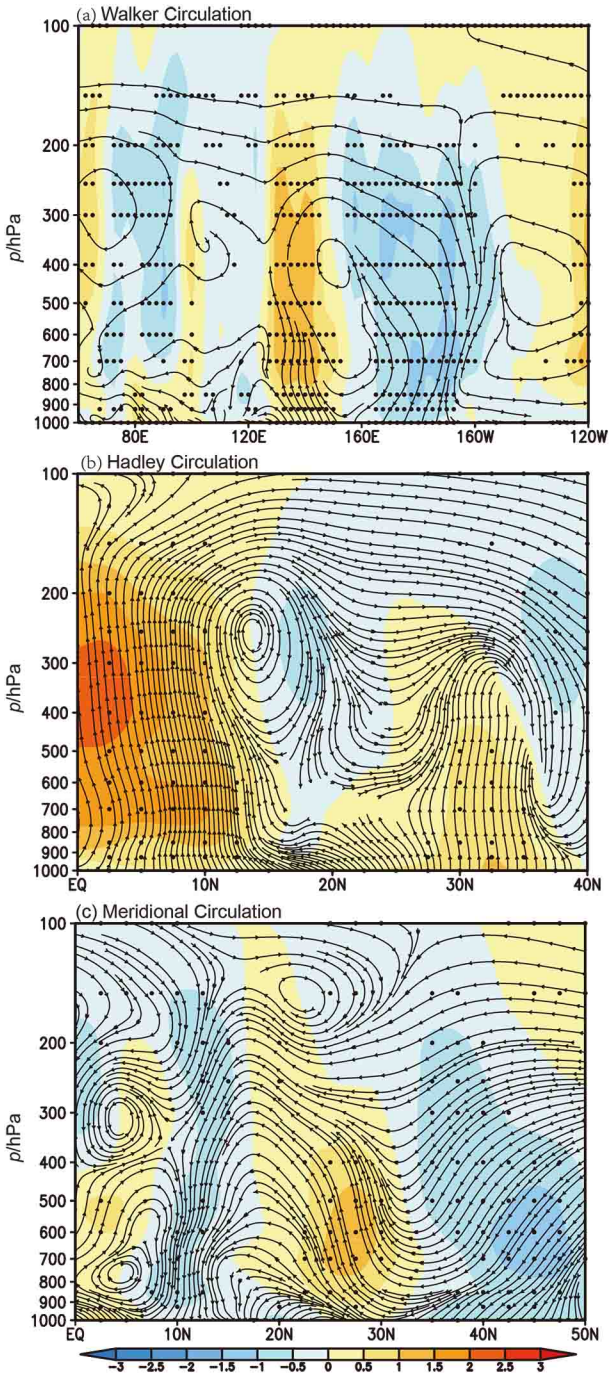

图 10 转折前后（a）Walker 环流（0°～20°N 平均）、（b）Hadley 环流（130°～150°E 平均）和（c）经向环流（100°～120°E 平均）差值的垂直剖面（阴影：垂直速度；实心圆点：通过 0.05 显著性水平检验）

Fig. 10 Differences in the (a) Walker circulation (0°–20°N), (b) Hadley circulation (130°–150°E), and (c) meridional circulation (100°–120°E) before and after the climate shift (Shaded area: vertical velocity; dots: significance level of 0.05)

流的上升运动（130°～150°E 平均）和赤道中东太平洋下沉运行均显著偏强，即 1990 年之后，西太平洋暖池的驱动下，Walker 环流较前一时段显著加强。与此同时，赤道西太平洋 Walker 环流的上升支在其北侧形成经向的 Hadley 环流（图 10b），并在中高层大气（300～200 hPa）的垂直方向形成顺时针环流异常中心。20°N 附近的垂直运动存在明显的负异常，有效的加强西太平洋下沉运动，有利于西太副高较前期偏强；30°～40°N 之间则对应上升运动偏强，主要对应中国长江中下游区域到日本中南部和韩国南部的梅雨带。图 10c 给出中国东部所在经向范围的经向环流（100°～120°E 平均）的垂直剖面图。可以看出，20°～30°N 对应的华南和长江中下游区域主要对应上升运动偏强，造成该区域转折后降水较前场显著偏多，40°～50°N 对应的华北和东北等区域则对应下沉运动偏强，有利于这些区域降水较前期明显减少（图 4c）。

西太平洋副热带高压的各项指标（面积指数、强度指数和脊线位置）与中国东部夏季极端降水的相关系数分别为 0.38、0.37 和 0.26，均通过 0.05 的显著性水平检验，即西太平洋副热带高压对中国东北夏季极端降水有着较为重要的影响。图 11a–c 给出了西太平洋副热带高压的各项指标转折前后距平的平均值。可以发现，在中国东部夏季极端降水年代际转变前后，西太副高的面积增大、强度加强，脊线位置南移动，低纬度向北的水汽输送偏少，北方地区降水偏少，而初夏副高外围的华南到长江中下游区域多为水汽辐合区，有利于降水降水偏多（Chow et al., 2008）。

此外，西太平洋暖池的增暖还对南海高压产生影响，主要表现为中国南海（10°～20°N）上空垂直运动出现显著负异常（图 10c），有效增强了南海高压，南海高压的面积增大、强度加强（图 11d, e），二者与中国东部夏季极端降水的相关系数分别为 0.39 和 0.38，均通过 0.05 的显著性水平检验。已有研究结果也表明，南海副热带高压偏强时，盛行下沉运动，南海夏季风及其相应的水汽输送建立偏晚，夏季风偏弱（任珂等, 2010）。在中高纬度地区，槽脊形势的强弱与夏季风一起决定了中国东部地区夏季经向环流的强弱，进而影响到水汽的输送和降水落区。东亚大槽与中国东部夏季极端降水相关系数为 0.41，通过 0.01 的显著性水平检验。1990 年前后，东亚大槽指数的强度从负距平转为正距平，有明显的增强（图 11f）。东亚大槽偏强，有利于北方干冷空气南下，造成东亚夏季风偏弱，

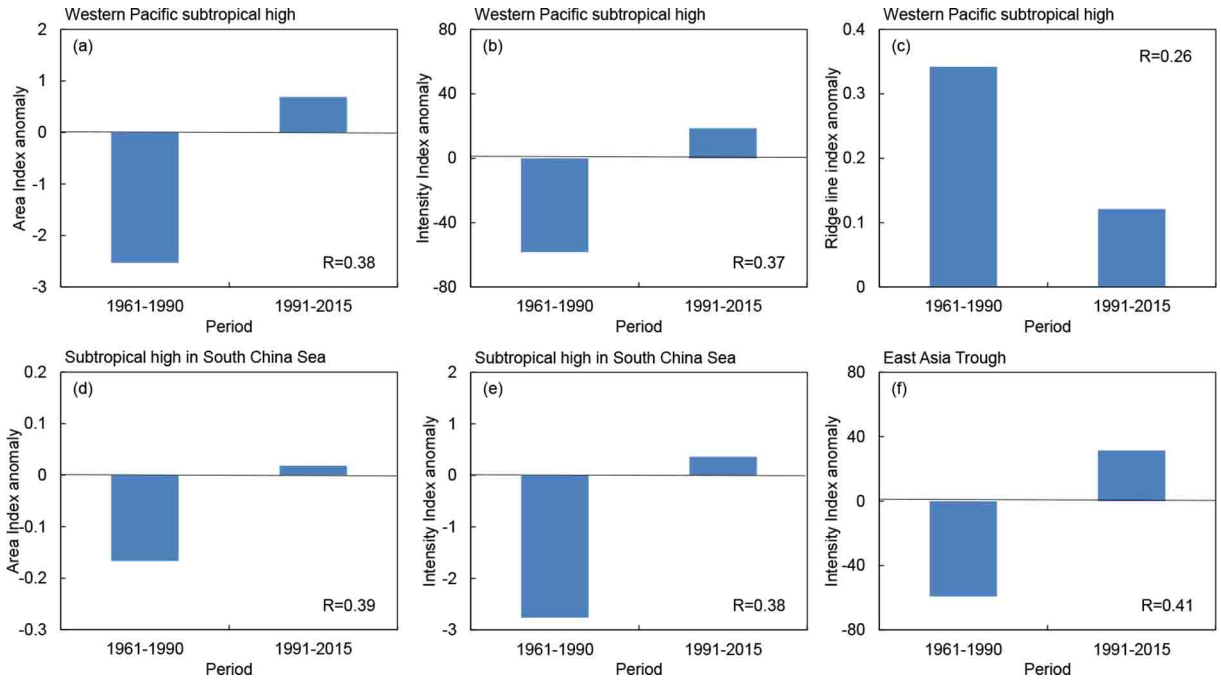

图 11　转折前后西太副高、南海副高和东亚大槽各指标夏季平均距平变化：（a）西太副高面积指数；（b）西太副高强度指数；（c）西太副高脊线指数；（d）南海副高面积指数；（e）南海副高强度指数；（f）东亚大槽强度指数

Fig. 11　Variation of index anomalies of the western Pacific subtropical high, South China Sea high, and East Asia Trough before and after the climate shift: (a) Area index of the West Pacific subtropical high; (b) intensity index of the West Pacific subtropical high; (c) ridge line index of the West Pacific subtropical high; (d) area index of the South China Sea high; (e) intensity index of the South China Sea high; (f) intensity index of the East Asia trough

低纬度水汽不利于向北输送，造成华北和东北等地降水偏少。同时，频繁南下的冷空气，在长江中下游和江南等地与暖湿气流相遇，造成这些区域极端降水频次变大，强度变强，极端降水量增大（沈柏竹等, 2012）。

在各纬度高低层环流异常的配合下，中国东部夏季水汽输送呈现出显著的差异。转折前，强劲的夏季风配合中高纬度出现的气旋性环流异常，在中国东部形成非常强的水汽输送带，来自孟加拉湾和太平洋的水汽能够输送至华北地区（图 12a）。转折后，随着东亚夏季风的减弱、中高纬度东亚大槽加强，中国东部经向水汽输送呈现负异常，向北水汽输送减弱，仅华东和华南因位于西太副高西北侧，受加强并南移的西太副高影响，经向水汽输送增加（图 12b），最终在中国南方（20°～35°N）形成显著的上升运动异常，极端降水偏多；而在华北则为显著的下沉运动异常，极端降水偏少（图 10c）。

6　结论与讨论

本文分析了中国东部夏季极端降水在 1990 年前后的年代际演变特征，并通过对中国东部与西太平洋暖池（海温关键区）海陆热力性差异演变的研究，探寻其对东亚夏季风乃至中国东部夏季极端降水的影响机制。主要结论如下：

1961～2015 年中国东部夏季极端降水呈现略微的增长趋势，并在 1990 年前后存在显著的年代际转变，极端降水由偏少转为偏多。转折后中国东部夏季极端降水模态代表的分布型更为典型。主要表现为极端降水落区南移，南方偶极子分布型加强，华南和华东地区，极端降水量和降水日数增加，对夏季降水的贡献率增大；华北地区，极端降水量和降水日数减少，对夏季降水的贡献率减小。

西太平洋暖池区海温相比于中国东部地区对气候变化的响应更灵敏，增温速率更快，其异常升温造成的海陆温差减小是中国东部夏季极端降水 1990 年前后转变的重要驱动因素之一。它通过中低纬度 Walker 环流和 Hadley 环流调整，导致东亚夏季风减弱、西太副高增强并南移、南海副高增强。与此同时，转折后中高纬度地区气旋性环流异常的破坏，东亚大槽增强，有利于北方干冷空气南下。

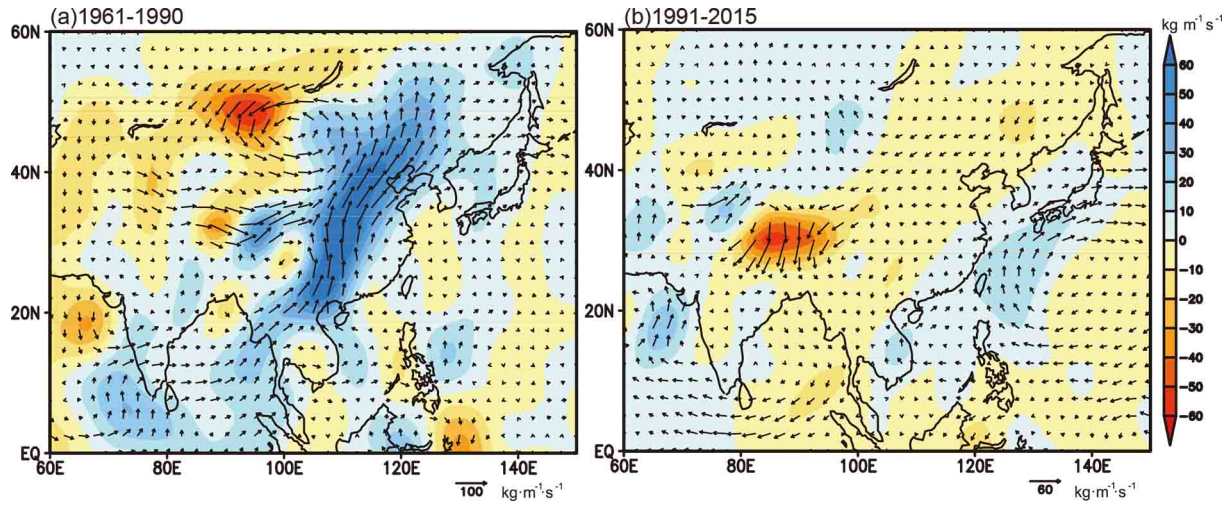

图 12 转折前后夏季平均水汽通量距平（矢量：整层水汽通量；阴影：经向整层水汽通量；单位：$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$）

Fig. 12 Water vapor flux anomalies before and after the climate shift (units: $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$). Vector: total water vapor flux; shaded area: total water vapor flux in meridional direction

在南北环流系统共同作用下，中国东部夏季水汽输送出现年代际调整，华北经向水汽输送减弱，下沉运动显著加强，极端降水减少；华南和华东地区水汽输送加强，上升运动显著偏强，有利于降水偏多，并伴随极端降水量和降水日数有所增加。

从全球角度而言，随着地表温度的升高，海陆热力差异逐渐加大，大尺度环流结构发生调整，区域性、全球性水循环加剧，进而导致极端降水的空间分布、频次和强度发生变化（Overland and Wang, 2010; You et al., 2011）。然而，中国东部地区毗邻海温增暖最显著的西太平洋暖池区，其海陆热力性差异却呈现减小的变化，具有很强的区域性特点，其导致的中国东部极端降水的空间分布亦有其独特的演变特征。本文仅从海陆热力性差异引起的大尺度环流调整方面对中国东部夏季极端降水的年代际转变特征进行分析，其具体的影响机制仍有待进一步研究。

参考文献（References）

Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al. 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation [J]. J. Geophys. Res., 111(D5): D05109. doi:10.1029/2005JD006290

Chow K C, Tong H W, Chan J C L. 2008. Water vapor sources associated with the early summer precipitation over China [J]. Climate Dyn., 30(5): 497−517. doi:10.1007/s00382-007-0301-6

Ding R Q, Ha K J, Li J P. 2010. Interdecadal shift in the relationship between the East Asian summer monsoon and the tropical Indian Ocean [J]. Climate Dyn., 34(7-8): 1059−1071. doi:10.1007/s00382-009-0555-2

Duan A M, Sui C, Wu G X. 2008. Simulation of local air–sea interaction in the great warm pool and its influence on Asian monsoon [J]. J. Geophys. Res., 113(D22): D22105. doi:10.1029/2008JD010520

Feng G L, Gong Z Q, Zhi R, et al. 2008. Analysis of precipitation characteristics of South and North China based on the power-law tail exponents [J]. Chinese Physics B, 17(7): 2745−2752. doi:10.1088/1674-1056/17/7/065

龚志强, 封国林. 2008. 中国近 1000 年旱涝的持续性特征研究 [J]. 物理学报, 57(6): 3920−3931. Gong Z Q, Feng G L. 2008. The research of durative characteristics of dry/wet series of China during the past 1000 years [J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 57(6): 3920−3931. doi:10.3321/j.issn:1000-3290.2008.06.102

龚志强, 赵俊虎, 封国林. 2013. 中国东部 2012 年夏季降水及年代际转型的可能信号分析 [J]. 物理学报, 62(9): 099205. Gong Z Q, Zhao J H, Feng G L. 2013. Analysis of the summer precipitation of 2012 in East China and its possibility of decadal shift [J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 62(9): 099205. doi:10.7498/aps.62.099205

Goswami B N, Venugopal V, Sengupta D, et al. 2006. Increasing trend of extreme rain events over India in a warming environment [J]. Science, 314(5804): 1442−1445. doi:10.1126/science.1132027

何光碧. 2012. 西南低涡研究综述 [J]. 气象, 38(2): 155−163. He G B. 2012. Review of the Southwest vortex research [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 38(2): 155−163. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2012.2.003

黄荣辉, 蔡榕硕, 陈际龙, 等. 2006. 我国旱涝气候灾害的年代际变化及其与东亚气候系统变化的关系 [J]. 大气科学, 30(5): 730−743. Huang R H, Cai R S, Chen J L, et al. 2006. Interdecaldal variations of drought and flooding disasters in China and their association with the East Asian climate system [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30(5): 730−743. doi:10.3878/j.issn.1006-

9895.2006.05.02

黄荣辉, 陈际龙, 刘永. 2011. 我国东部夏季降水异常主模态的年代际变化及其与东亚水汽输送的关系 [J]. 大气科学, 35(4): 589−606. Huang R H, Chen J L, Liu Y. 2011. Interdecadal variation of the leading modes of summertime precipitation anomalies over eastern China and its association with water vapor transport over East Asia[J].ChineseJournalofAtmosphericSciences(inChinese),35(4):589−606. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.04.01

IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1535pp.

江漫, 漆梁波. 2016. 1959～2012 年我国极端降水台风的气候特征分析 [J]. 气象, 42(10): 1230−1236. Jiang M, Qi L B. 2016. Analysis on climatic characteristics of extreme precipitating typhoon in China during 1959-2012 [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 42(10): 1230−1236. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2016.10.007

江志红, 陈威霖, 宋洁, 等. 2009. 7 个 IPCC AR4 模式对中国地区极端降水指数模拟能力的评估及其未来情景预估 [J]. 大气科学, 33(1): 109−120. Jiang Z H, Chen W L, Song J, et al. 2009. Projection and evaluation of the precipitation extremes indices over China based on seven IPCC AR4 coupled climate models [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33(1): 109−120. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.01.10

Jiang X M, Yuan H L, Xue M, et al. 2014. Analysis of a heavy rainfall event over Beijing during 21-22 July 2012 based on high resolution model analyses and forecasts [J]. Journal of Meteorological Research, 28(2): 199−212. doi:10.1007/s13351-014-3139-y

Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77(3): 437−472. doi:10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2

Li J, Wang B. 2018. Predictability of summer extreme precipitation days over eastern China [J]. Climate Dyn., 51(11): 4543−4554. doi:10.1007/s00382-017-3848-x

Lu R Y. 2002. Indices of the summertime western North Pacific subtropical high [J]. Adv. Atmos. Sci., 19(6): 1004−1028. doi:10.1007/s00376-002-0061-5

Lu R Y, Lu S. 2015. Asymmetric relationship between Indian ocean SST and the western North Pacific summer monsoon [J]. J. Climate, 28(4): 1383−1395. doi:10.1175/JCLI-D-14-00289.1

North G R, Bell T L, Cahalan R F, et al. 1982. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions [J]. Mon. Wea. Rev., 110(7): 699−706. doi:10.1175/1520-0493(1982)110<0699:SEITEO>2.0.CO;2

Overland J E, Wang M Y. 2010. Large-scale atmospheric circulation changes are associated with the recent loss of Arctic sea ice [J]. Tellus A, 62(1): 1−9. doi:10.1111/j.1600-0870.2009.00421.x

Qian W, Lin X. 2005. Regional trends in recent precipitation indices in China [J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 90(3-4): 193−207. doi:10.1007/s00703-004-0101-z

任国玉, 封国林, 严中伟. 2010. 中国极端气候变化观测研究回顾与展望 [J]. 气候与环境研究, 15(4): 337−353. Ren G Y, Feng G L, Yan Z W. 2010. Progresses in observation studies of climate extremes and changes in the mainland of China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15(4): 337−353. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2010.04.01

任珂, 何金海, 祁莉. 2010. 东亚副热带季风雨带建立特征及其降水性质分析 [J]. 气象学报, 68(4): 550−558. Ren K, He J H, Qi L. 2010. The establishment characteristics of the East Asian subtropical monsoon rain-belt and an analysis of its nature of precipitation [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 68(4): 550−558. doi:10.11676/qxxb2010.053

沈柏竹, 张世轩, 杨涵洧, 等. 2012. 2011 年春夏季长江中下游地区旱涝急转特征分析 [J]. 物理学报, 61(10): 109202. Shen B Z, Zhang S X, Yang H W, et al. 2012. Analysis of characteristics of a sharp turn from drought to flood in the middle and lower reaches of the Yangtze River in spring and summer in 2011 [J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 61(10): 109202. doi:10.7498/aps.61.109202

施能. 2009. 气象统计预报 [M]. 北京: 气象出版社, 128–145. Shi N. 2009. Meteorological Statistics and Forecast (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 128–145.

施能, 朱乾根, 吴彬贵. 1996. 近 40 年东亚夏季风及我国夏季大尺度天气气候异常 [J]. 大气科学, 20(5): 575−583. Shi N, Zhu Q G, Wu B G. 1996. The East Asian summer monsoon in relation to summer large scale weather–climate anomaly in China for last 40 years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 20(5): 575−583. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1996.05.08

孙建奇, 敖娟. 2013. 中国冬季降水和极端降水对变暖的响应 [J]. 科学通报, 58(12): 1395−1401. Sun J Q, Ao J. 2013. Changes in precipitation and extreme precipitation in a warming environment in China [J]. Chinese Science Bulletin, 58(12): 1395−1401. doi:10.1007/s11434-012-5542-z

王万里, 王颢樾, 谢应齐, 等. 2012. 夏季东亚大槽和副热带高压年代际变化的分析 [J]. 地球科学进展, 27(3): 304−320. Wang W L, Wang H Y, Xie Y Q, et al. 2012. Analysis of decade variation of East Asia trough and western Pacific subtropical high in summer [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 27(3): 304−320.

魏凤英. 2007. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 2 版. 北京: 气象出版社, 296 pp. Wei F Y. 2007. Modern Statistical Diagnosis and Prediction Technology on Climate (in Chinese) [M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press, 296pp.

Wu R G, Wen Z P, Yang S, et al. 2010. An interdecadal change in southern China summer rainfall around 1992/93 [J]. J. Climate, 23(9): 2389−2403. doi:10.1175/2009JCLI3336.1

吴佳, 周波涛, 徐影. 2015. 中国平均降水和极端降水对气候变暖的响应: CMIP5 模式模拟评估和预估 [J]. 地球物理学报, 58(9): 3048−3060. Wu J, Zhou B T, Xu Y. 2015. Response of precipitation and its extremes over China to Warming: CMIP5 simulation and projection [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 58(9): 3048−3060. doi:10.6038/cjg20150903

Yang H, Sun S Q. 2003. Longitudinal displacement of the subtropical high in the western Pacific in summer and its influence [J]. Adv. Atmos. Sci., 20(6): 921−933. doi:10.1007/BF02915515

You Q L, Kang S C, Aguilar E, et al. 2011. Changes in daily climate

extremes in China and their connection to the large scale atmospheric circulation during 1961-2003 [J]. Climate Dyn., 36(11-12): 2399−2417. doi:10.1007/s00382-009-0735-0

Yu R C, Zhou T J. 2007. Seasonality and three-dimensional structure of interdecadal change in the East Asian monsoon [J]. J. Climate, 20(21): 5344−5355. doi:10.1175/2007JCLI1559.1

翟盘茂, 潘晓华. 2003. 中国北方近 50 年温度和降水极端事件变化 [J]. 地理学报, 58(S1): 1−10. Zhai P M, Pan X H. 2003. Change in extreme temperature and precipitation over northern China during the second half of the 20th century [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 58(S1): 1−10. doi:10.3321/j.issn:0375-5444.2003.z1.001

Zhai P M, Zhang X B, Wan H, et al. 2005. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China [J]. J. Climate, 18(7): 1096−1108. doi:10.1175/JCLI-3318.1

翟盘茂, 李蕾, 周佰铨, 等. 2016. 江淮流域持续性极端降水及预报方法研究进展 [J]. 应用气象学报, 27(5): 631−640. Zhai P M, Li L, Zhou B Q, et al. 2016. Progress on mechanism and prediction methods for persistent extreme precipitation in the Yangtze–Huai River valley [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 27(5): 631−640. doi:10.11898/1001-7313.20160511

张勇, 许吟隆, 董文杰, 等. 2006. 中国未来极端降水事件的变化——基于气候变化预估结果的分析 [J]. 自然灾害学报 (S1): 228−234. Zhang Y, Xu Y L, Dong W J, et al. 2006. Change of extreme precipitation events in China in future: An analysis based on prediction of climate change [J]. Journal of Natural Disasters(S1): 228−234.

Zhou T J, Zou L W. 2010. Understanding the predictability of East Asian summer monsoon from the reproduction of land–sea thermal contrast change in AMIP-Type simulation [J]. J. Climate, 23(22): 6009−6026. doi:10.1175/2010jcli3546.1